

Durchgeführte Forschungstätigkeiten an der Fachhochschule Bielefeld 1985-2000 und im Anschluss daran.

Gegen Ende meiner *Forschungstätigkeit* mit Bezug zum **Labor für Hydromechanik und Wasserbau** des Fachbereiches Architektur und Bauingenieurwesen am Standort Minden gebe ich (Autor) hiermit diesbezüglich Kenntnis von den Aktivitäten, die ich auch noch nach meiner Pensionierung auf dem Gebiet der Forschung im **Küsteningenieurwesen** bis 2020 fortgesetzt habe.

Mit seinem Nachweis des **Phasensprungs $\Delta\varphi$** zwischen den aus dem Tiefwasser in ein Gebiet begrenzter Wassertiefe *einfallenden* und den daraus *reflektierten* Wasserwellen (vergl. <http://www.digibib.tu-bs.de/?docid=00056885>) hat der Autor offenbar einen Parameter gefunden, der hinsichtlich der Beschreibung der Wasserwellenbewegung in Bereichen gefehlt hat, deren Wassertiefe d geringer ist als etwa die Hälfte der dort vorhandenen Wellenlänge L (Bedingung $d \leq L/2$), d.h., im gesamten küstennahen Bereich. Demnach kann erwartet werden, dass die Behandlung der Transformation partiell stehender Wellen als *Interferenzproblem* künftig einen Paradigmenwechsel in der Brandungsforschung einleiten wird, vergl. Abbildung unten.

Ein praktisches Ergebnis des Autors, besteht in der Definition des komplexen Reflexionskoeffizienten (CRC), vergl. <http://www.digibib.tu-bs.de/?docid=00047022>

$$\Gamma = C_r e^{i\Delta\varphi}.$$

Dieser besagt, dass die Reflexion bei Wasserwellen nicht wie bisher nur allein durch das Höhenverhältnis der reflektierten zur einfallenden Wellenhöhe $C_r = H_r / H_i$ bestimmt ist, sondern dass dabei der Phasensprung $\Delta\varphi$ zwischen der einfallenden und der reflektierten Welle auftritt, der seinerseits gemäß der gefundenen Beziehung

$$\Delta\varphi = 180^\circ - 2\alpha$$

von der Seegrundneigung (bzw. Böschungsneigung) α abhängt.

Die genannten Erkenntnisse haben am Ende zur Aufstellung einer *neuen linearen Wellentheorie* geführt, die insbesondere auch die Existenz der letzteren Formel erfordert und eine *theoretische* Abhängigkeit des CRC von der Böschungsneigung α begründet, vergl. <https://doi.org/10.24355/dbbs.084-201912201126-0>.

Die neue Theorie kann die bisher von Ingenieuren vornehmlich verwendete lineare Wellentheorie nach Airy-Laplace (1842) ersetzen, da sie im Gegensatz zu letzterer einerseits den Satz von der Erhaltung der Masse (Kontinuitätsbedingung) erfüllt und andererseits auch die Randbedingung eines geeigneten Seegrundes mit $0 \leq \alpha \leq 90^\circ$ abdeckt.

Die Tatsache, dass der neue Ansatz insbesondere den im physikalischen Modell ermittelten (von der Böschungsneigung abhängigen) Phasensprung $\Delta\varphi$ bestätigt, ist Beleg für die Notwendigkeit derartiger kleinmaßstäbiger Untersuchungen, wie solche etwa unter Verwendung des kombinierten Strömungs- und Wellenkanals (KSW) der Fachhochschule Bielefeld ermöglicht werden.

Bevor ich im Jahre 1984 als Professor für die Bereiche Hydromechanik, Wasserbau und Wasserwirtschaft des Standortes Minden der FH Bielefeld berufen worden war, hatte ich nach meinem Studium des Bauingenieurwesens an der TU Braunschweig die folgenden Positionen inne:

Statiker und Konstrukteur im Bereich Stahlwasserbau bei der Fried. Krupp GmbH in Rheinhausen (1968-1971), ab 1971 wissenschaftliche Dienststellungen an der TU Braunschweig als wiss. Assistent, nach Promotion 1974 als Oberingenieur und 1978-1983 aufgrund habilitationsäquivalenter Leistungen in korporationsrechtlicher Stellung eines Professors und Leiter der Abteilung Hydromechanik, Stahlwasserbau und Offshore-Bau am Leichtweiß-Institut für Wasserbau an der TU Braunschweig.

Als Leiter von Teilprojekten der Sonderforschungsbereiche der DFG 79 und 205, betraf meine Beteiligung im Hinblick auf Untersuchungen im Großen Wellenkanal (GWK), die Thematik „Wellenkräfte auf Seebauwerke im Flachwasserbereich“.

Ab 1993 war ich auch als Beratender Ingenieur im Bereich hydrostatischer und hydrodynamischer Bauwerkbelastungen tätig.

Standörtliche und versuchstechnische Randbedingungen

Unter dem Dekanat von Prof. Dipl.-Ing., Dipl.-Wirtsch.-Ing. Gerhard Richter hatte ich in dem genannten Fachbereich der FH Bielefeld das *große Glück*, die großzügige Unterstützung meiner Kollegen für den Neubau des genannten Labors für Hydromechanik und Wasserbau zu erhalten. Dies betraf nicht nur den Dekan und die Kollegen Prof. Bollmann und Prof. Wehrmeister, die als Architekten den Entwurf der Halle des Labors erstellt hatten, sondern insbesondere die Unterstützung durch den damaligen Rektor der FH, Prof. Dr. Heinrich Ehlebracht. Nicht zuletzt sind meine Mitarbeiter im Labor, die Herren Dipl.-Ing. Holtmann (bezüglich des Wasserversorgungssystems), Dipl.-Ing. Keull (bezüglich der Messdatenanalyse) und Herr Gerstendorf (bezüglich des Modellbaues) zu nennen.

So gelang es mir, insbesondere von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) und vom Ministerium für Wissenschaft und Forschung NRW die Mittel für die Ausrüstung des von mir konzipierten **kombinierten Strömungs- und Wellenkanals** (KSW) sowie der zugehörigen Messwert-Analyse-Peripherie einzuwerben, vergl. <http://www.digibib.tu-bs.de/?docid=00054173>.

Dabei hatte auch eine Rolle gespielt, dass einerseits die Fried. Kupp GmbH, der ich früher angehört hatte, bezüglich der *Strömungskomponente* des genannten Großgerätes Forschungsaufträge für die Untersuchung der hydraulischen Lasten von **Stahlwasserbaukonstruktionen** in Aussicht gestellt hatte. Andererseits gab und gibt es auch weiterhin hinreichend großen Forschungsbedarf bezüglich der Effekte von Wasserwellen, für deren Bearbeitung Modelle im *verkleinerten Maßstab* geeignet sind. Das sind nicht nur solche, die studienbegleitend im Grundstudium innerhalb der Hydromechanik als hydraulische Experimente durchgeführt werden, sondern insbesondere auch Untersuchungen zur Entstehung von **Lasteffekten an Bauwerken**.

Entgegen dem Trend in den 1980 Jahren, hierfür Modellstrukturen **im Naturmaßstab** (1:1) zu verwenden, für die in Deutschland der bekannte **Große Wellenkanal** (GWK) der Technischen Universität Braunschweig und der Universität Hannover (mit einer Länge von etwa **310m**) gebaut worden war, werden von Forschern immer öfter auch die mit der **Größe** der zu untersuchenden Modellstrukturen verbundenen **Nachteile** (nach Personal- und Mitteleinsatz sowie Zeitbedarf) erkannt.

Tatsächlich konnten die Forschungsergebnisse im hier dargestellten Umfang nur angesichts des **Vorteils des KSW** mit seiner Länge von etwa 15m, dem damit verbundenen wesentlich geringem Mitteleinsatz und dem überschaubaren Zeitbedarf erreicht werden. Von besonderer Bedeutung war darüber hinaus, dass der Verfasser **allein** für den Forschungseinsatz dieses Großgerätes zuständig war, was bezüglich des GWK nicht der Fall gewesen wäre.

Da naturgemäß bei den Studierenden das Interesse an der Mitwirkung an Forschungsaufgaben groß ist, sind im Zeitraum 1988-2001 die nachfolgend aufgeführten 38 experimentellen Diplomarbeiten (von insgesamt 77) unter Verwendung des KSW entstanden.

Experimentelle Diplomarbeiten zum Thema Durchströmbare Deckwerke unter Verwendung des kombinierten Strömungs- und Wellenkanals der FH Bielefeld.

<u>Diplomand/in, Jahr,</u>	<u>Thema</u>
Ebert, H. (1988)	Wellenerscheinungen an Deichböschungen
Scheiding, K. (1988)	Beeinflussung des Wellenbrechens an Deichböschungen
Hohmann, A. (1989)	Bewegung des Sickerwassers in einem homogenen Deich während des Ablaufes einer Sturmtide
Heidebruch, S., (1989)	Reflexionserscheinungen an Sperrwerksverschlüssen mit geneigter Stauwand
Herzog, M. (1989)	Reflexionserscheinungen an Sperrwerksverschlüssen mit geneigter Stauwand. Bearbeitungsschwerpunkt: reguläre Wellen
Hupe, H. (1989)	Reflexionserscheinungen an Sperrwerksverschlüssen mit geneigter Stauwand. Bearbeitungsschwerpunkt: irreguläre Wellen

Wollbrink, M. (1989)	Reflexionserscheinungen an Sperrwerksverschlüssen mit geneigter Stauwand. Bearbeitungsschwerpunkt: Modellstruktur
Welp, G. (1990)	Längswerke zur Sicherung von Dünen und Kliffs an der Westküste der Insel Sylt
Böke-Hasselmeier, M. (1990)	Wellenbrecher als Schutzwerke für die Hafeneinfahrt der Insel Baltrum
Giesecking, M. (1990)	Wellenbrecher als Küstenschutzwerke für die Westküste der Insel Sylt
Husmeier, R. (1990)	Wellenbrecher als Küstenschutzwerke für die Westküste der Insel Sylt
Brandt, I. (1991)	Wellenbrecher als Küsten- und Hafenschutzbauwerke
Scheer, A. (1991)	Wellenbrecher als Küsten- und Hafenschutzbauwerke
Sünderkamp, J. (1991)	Reflexionserscheinungen irregulärer Wellen an geböschten Uferschutzbauwerken
Fleer, R. (1992)	Formkörper aus Beton an geböschten Uferschutzbauwerken
Kuhnke, R. (1992)	Formkörper aus Beton an geböschten Uferschutzbauwerken
Hagemeyer, (1992)	Reflexion irregulärer Wellen an geböschten Uferschutzbauwerken
Kramer, M. (1992)	irregulärer Wellen an geböschten Uferschutzbauwerken
Eberhard, H. (1992)	Reflexion irregulärer Wellen an geböschten Uferschutzbauwerken
Lemke, C. (1993)	Verteilung der Energie partiell stehender Wellen vor geböschten Uferschutzbauwerken
Köster, T. (1993)	Beeinflussung des Wellenbrechens und der Waschbewegung an geböschten Uferschutzbauwerken
Spieß, G. (1993)	Beeinflussung des Wellenbrechens und der Waschbewegung an geböschten Uferschutzbauwerken
Gramsch, F. (1993)	Reflexion kurzer unregelmäßiger Wellenfolgen an einer Böschung 1:3 bei drei unterschiedlich gestalteten Deckwerksausbildungen
Thienelt, W. (1994)	Partiell stehende Wellen an unterschiedlich geneigten Böschungsbauwerken
Kruse, C. (1994)	Erfassung der Druckverhältnisse in brechenden Wasserwellen und im Wellenauflauf
Meyer, O. (1995)	Partiell stehende Wellen an unterschiedlich geneigten Böschungsbauwerken
Lemke, S. (1997)	Reflexion an einer aus Beton-Hohlformkörpern bestehenden Böschung mit der Neigung 1:2
Nicolai, A. (1997)	Reflexion an einer aus Beton-Hohlformkörpern bestehenden Böschung mit der Neigung 1:2
Bicknese, W. (1998)	Reflexion an einer aus Beton-Hohlformkörpern bestehenden Böschung mit der Neigung 1:0,5
Klöpper, U. (1998)	Reflexion an einer aus Beton-Hohlformkörpern bestehenden Böschung mit der Neigung 1:0,5
Heidemann, D. (1998)	Standsicherheit wellenbelasteter Böschungen aus Beton-Hohlformkörpern
Ripke, M. (1998)	Standsicherheit wellenbelasteter Böschungen aus Beton-Hohlformkörpern
Bierauer, M-A. (1999)	Reflexion kurzer Wellengruppen an einer Böschung aus Beton-hohlformkörpern (Hollow Cubes)
Corinth, K.S. (1999)	Reflexion kurzer Wellengruppen an einer Böschung aus Beton- Hohlformkörpern (Hollow Cubes)
Ortmann, O. (2000)	Reflexion an einer aus Beton-Hohlformkörpern (Hollow Cubes) bestehenden Böschung mit einer Neigung 1:m = 1:1,5"
Kix, U. (2001)	Reflexion an einer aus Beton-Hohlformkörpern (Hollow Cubes) bestehenden Böschung mit einer Neigung 1:m = 1:2,5. Bearbeitungsschwerpunkt: Internetfähige Dokumentation
Reischl, C. (2001)	Reflexion an einer aus Beton-Hohlformkörpern (Hollow Cubes) bestehenden Böschung mit einer Neigung 1:m = 1:2,5. Bearbeitungsschwerpunkt: Freak- Waves
Rocklage, O. (2001)	Reflexion an einer aus Beton-Hohlformkörpern (Hollow Cubes) bestehenden Böschung mit einer Neigung 1:m = 1:2,5. Bearbeitungsschwerpunkt: Ergebnisse mit irregulären Wellen.

Für die Begeisterung bei der Mitwirkung der genannten Diplomandinnen und Diplomanden an den betreffenden Untersuchungen möchte ich an dieser Stelle ebenfalls meinen Dank aussprechen.

Problemstellung

Fast alle genannten Arbeiten sind mit Bezug auf das Europa-Patent **Uferschutzbauwerk** „Durchströmbare Böschungsdeckwerke“, (Europäisches Patentamt EP 0 451 521 B1) des Autors (vergl. <http://www.digibib.tu-bs.de/?docid=00046743>) durchgeführt worden.

Dabei stand bei der Mehrzahl der Untersuchungen der Wechselwirkungsprozess zwischen der oberflächennahen Wasserteilchenkinematik etwa an einer Deichböschung *ankommender Wellen* und derjenigen des Rücklaufes der jeweils vorausgegangenen Welle im Mittelpunkt des Interesses. Konkret bestand dabei das Ziel, die etwa beim Wellenbrechen auftretenden wellenerzeugten Bauwerkbelastungen und den Wellenaufbau zu minimieren und durch Separierung der Strömungsfelder etwa vorhandene resonante Reflexionseffekte zu dämpfen bzw. zu vermeiden.

Vorarbeiten und Forschungskonzept mit verkleinerten physikalische Modellstrukturen im KSW

Vorteilhaft hatte der Verfasser auf die Erfahrungen zurückgreifen können, die er seinerzeit, erstmals in Deutschland, mit der **spektralen Datenanalyse** von **Naturmessdaten** von Wellen und Strömungen vor Sylt im Rahmen seiner Dissertation (1974) erlangt hatte und in mehrjährigen Untersuchungen von **Resonanzerscheinungen** in natürlichen Brandungszonen angewandt hatte.

Bei *verkleinerten Modellen* waren bis dahin für den Nachweis **vermuteter partiell stehender Wellen** vor Bauwerken deren *Wasserspiegelauslenkungen* bis dahin lediglich mit *analogen* Schwärzungsdiagrammen von einer in Reihe angeordneter elektronischer Wellenpegel dokumentiert worden.

Um im Falle **natürlicher irregulärer Wellen** *genauere Aussagen* über die Entwicklung der Reflexion zu erlangen, bot sich an, dies nunmehr auf der Grundlage der Berechnung von **Energiespektren** der Wasserspiegelauslenkungen zu tun. Konkret wurde dabei auf die Proportionalität von Wellenenergie E und dem Wellenhöhequadrat H^2 ($E \sim H^2$) Bezug genommen. So hatte der Autor bereits seit 1992 das Wellenhöhenverhältnis $C_r = H_r / H_i$ durch die Beziehung

$$C_{r,i} = \frac{\sqrt{E_{\max,i}} - \sqrt{E_{\min,i}}}{\sqrt{E_{\max,i}} + \sqrt{E_{\min,i}}}$$

ersetzt, bei der sich der Index i sowohl um das Frequenz-Inkrement als auch bezogen auf Partialwellen um Teilfrequenzbänder des jeweiligen Energiespektrums handeln kann.

Orientiert an den vor Sylt gemessenen Energiespektren des Autors wurde von einer reproduzierbaren **Sequenz unregelmäßiger Wellen** mit vorgegebener Dauer ausgegangen. Diese wurden von einem **Spektrren-Wellengenerator** am Kopfende des KSW erzeugt und synchron in zwei durch eine Wand getrennte parallele Teilkanäle des insgesamt 1,6m breiten Kanals eingeleitet. Während für die zu testenden patentierten Hohlformkörper-Strukturen als Elemente eines sogenannte **Hohldeckwerkes** am anderen Ende des KSW die Kanalbreite $B_1 = 1,0\text{m}$ zur Verfügung stand, betrug die Breite der „theoretisch“ glatten Vergleichskonfiguration etwa $B_2 = 0,55\text{m}$. Mit dem Bezugspunkt IP (Schnittpunkt der 1:n-geneigten Böschung mit dem Ruhewasserspiegel) wurden die Wasserspiegelauslenkungen in Abständen von 10cm zunächst vor einer Böschungsneigung 1:n = 1 : 3 ($\alpha = 18,43^\circ$) über fast die gesamte vor den Bauwerken vorhandene Länge (rd. 10m) des KSW *quasi-synchron* in beiden Teilkanälen mit elektronischen Wellenpegeln erfasst, vergl. <http://www.digibib.tu-bs.de/?docid=00046688>.

Um die Energieanteile *abgrenzbarer* Frequenzbereiche zu erhalten, war es jedoch erforderlich, die analogen Messsignale der Wasserspiegelauslenkungen in digitale Signale zu wandeln und diese bezüglich jeder Pegelposition für die Berechnung von **Energiespektren** zu verwenden. Da deren spektraler Integralwert (proportional der Fläche unter dem Spektrum) der Gesamtenergie *des Spektrums* entspricht, waren nunmehr direkte Vergleiche der gesamten **Wellenaktivität** bzw. deren auf Teilfrequenzbänder bezogenen Anteile für jede Pegelposition möglich.

Somit waren die betreffenden Energieniveaus zumindest über 2 Wellenlängen vor den unterschiedlichen Bauwerken vergleichbar und konnten zur Optimierung der Hohlformkörper verwendet werden. Da die **maximalen Bauwerksbelastungen** erwartungsgemäß in unmittelbarer Bauwerksnähe auftreten, konnte in den Folgeuntersuchungen mit veränderten Neigungen $1:n \geq 1:3$ und modifizierten Hohlformkörper-Strukturen der Messbereich vor dem Bauwerk aufgrund der gemachten Erfahrungen ggf. auf etwa 1 bis $\frac{1}{4}$ -Wellenlänge

beschränkt werden. So konnten, von Diplomanden begleitet, eine *Vielzahl* von Hohlformkörpertypen an Neigungen $1:3 \leq 1:n \leq 1:0,5$ untersucht werden.

Chronologie der wissenschaftlichen Erkenntnisse

Ausgehend von der Vermutung resonanter Schwingbewegungen im Überlagerungsbereich von partiell stehenden Wellen einerseits und der Wellenaufbau-Rücklauf-Bewegung andererseits, sind die eingangs zusammengefassten Forschungsergebnisse erhalten worden.

So waren bereits 1995 durch Untersuchungen mit regelmäßig erzeugten Wellen erstmals die Abhängigkeiten der auf die jeweilige Wellenlänge L bezogenen Entfernungen a der Böschungsnächsten partiellen Schwingungsknoten partiell stehender Wellen von der Böschung von mehreren Parametern nachgewiesen worden, vergl. <http://www.digibib.tu-bs.de/?docid=00043817>.

Diese sind: die Böschungsneigung α und die Wellenlänge L bzw. Wellenperiode T (bzw. Wellenfrequenz $f (= 1/T)$). Dabei hatte sich ergeben, dass an allen untersuchten Böschungsneigungen die Wellen mit einem umso weiter seewärtigen Abstand von IP **reflektiert** werden, je länger sie sind. Dieses generelle Ergebnis trifft dabei weitgehend unabhängig von der Oberflächenbeschaffenheit der reflektierenden Oberfläche zu und ist mit der bekannten Tatsache in Übereinstimmung, dass generell mit abnehmender Wassertiefe d die Wellenlängen L und die Wellenfortschrittgeschwindigkeiten c abnehmen. Letzterer Sachverhalt konnte auch für irregulären Wellen, durch eine entsprechende Analyse der für jede Messstation berechneten Energiespektren, nachgewiesen werden.

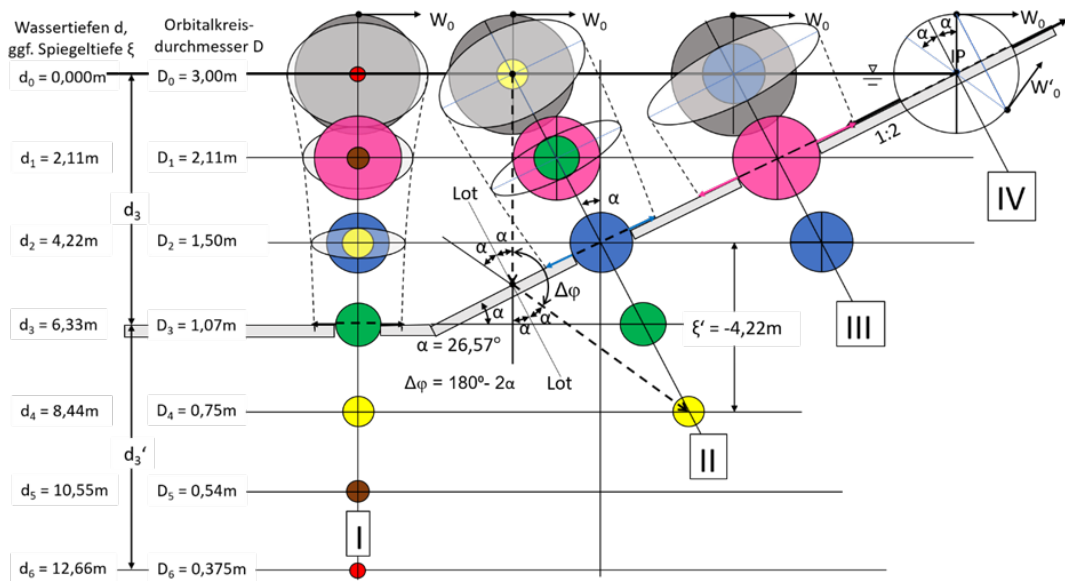
Insbesondere der Unterschied zwischen den unterschiedlichen Ausbildungsformen der **brechenden** Wellen einerseits und den Messwerten an den theoretisch glatten Deckwerken im Vergleich zu den Hohldeckwerken andererseits hat den Verfasser veranlasst, eine theoretische Untersuchung einer **Phasenverschiebung $\Delta\varphi$** zwischen einfallenden und reflektierten Wellen vorzunehmen.

Die mit Kosinuswellen durchgeführte Untersuchung (vergl. <http://www.digibib.tu-bs.de/?docid=00056885>) mit vorgegebenen Werten für das **Wellenhöhenverhältnis** $C_r = H_r/H_i$ mit $0,1 \leq C_r \leq 1,0$ und für die **Phasenabstände** (Phasensprünge) $0^\circ \leq \Delta\varphi \leq 180^\circ$ beinhaltet als wesentliches Ergebnis die Abhängigkeit des bei $\Delta\varphi = 90^\circ$ wechselnden Vorzeichens des Wellenhöhenverhältnisses C_r von der Phasenverschiebung $\Delta\varphi$. Dementsprechend hat sich der Autor für die adäquat erweiterte neue Darstellung als *komplexen Reflexionskoeffizienten* (CRC) entschieden, vergl. <http://www.digibib.tu-bs.de/?docid=00047022>. Dabei war auf der Grundlage der bis dahin untersuchten Hohlkörper-Böschungsneigungen und glatten Böschungsneigungen im Bereich $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ *global* der Zusammenhang erkennbar, dass große Beträge des CRC mit kleinen Phasenverschiebungen $\Delta\varphi$ und umgekehrt auftreten. Bei den weniger steil geneigten Böschungen mit $\alpha \leq 45^\circ$ und kleineren Frequenzen bzw. längeren Wellen deutet sich die Tendenz zu einer Phasenverschiebung $\Delta\varphi \approx 90^\circ$ an, bei der Reflexion theoretisch **nicht** erfolgt.

Die neue Theorie beinhaltet insbesondere die Addition der Orbitalgeschwindigkeitsvektoren der in das Gebiet aus dem Tiefwasser einfallenden linearen Wellen und derjenigen ihrer *exponentiell reduziert reflektierten* (gespiegelten) Abbildungen. Ein derartiges Verfahren war bis dahin nur analytisch als Alternative für die Ableitung der klassischen Beziehungen für ein seichtes Meer von Schulejkin (1956) bezogen auf die Randbedingung eines ebenen Bodens angewandt worden. Die Lösung des vom Autor als „**Exponentiell reduzierte Reflexion**“ (**ERR**) bezeichneten Verfahrens umfasst nunmehr die *Gesamtheit* praktisch vorkommender Seegrundneigungen im Bereich $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$.

Analog zur optischen Spiegelung mit gleichgroßen Einfallswinkel- und Ausfallswinkeln α , wird in der nachfolgenden Abbildung exemplarisch bezüglich der Spiegelungsachse II von einem vertikalen Einfallsstrahl ausgegangen, der die geneigte Oberfläche des Seegrundes trifft und von dort mit dem auf das Lot bezogenen Ausgangswinkel α reflektiert wird. Dabei wird in der negativen Spiegeltiefe ($\xi' = -4,22\text{m}$ entsprechend $d_4 = 8,44\text{m}$) der gemäß $D = D_0 e^{-2\pi \frac{d}{L}}$ auf $D_4 = 0,75\text{m}$ reduzierte Orbitalkreis-Durchmesser erhalten.

Diese einfache lineare Theorie *erfüllt* den Satz von der Erhaltung der Masse und erklärt zudem den physikalischen Sinn der Randbedingung des Bodens als Spiegel analog der bekannten optischen Reflexion. Ferner beinhaltet sie den Vorteil, dass sie - etwa im Sinne schneller Überprüfungen örtlich zu erwartender Orbitalgeschwindigkeiten (nach Betrag und Richtung) - auch grafisch gelöst werden kann.



Prinzip der bei Anwesenheit von Wasserwellen an einer geeigneten Ebene vorhandenen elliptischen Bahnen der Wasserteilchen, basierend auf der Theorie der „Exponentiell reduzierten Reflexion“ (ERR).

Naturerprobung und Verwendung des Patentes

Im verkleinerten hydraulischen Modell waren bezüglich der Neigung 1:3 die Vergleiche von Hohldeckwerken mit der glatten Referenzoberfläche zugunsten der Hohldeckwerke wie folgt ausgefallen:

Die **Energie der am Bauwerk brechenden Wellen** war bis zu **rd. 40%** reduziert und die **Energie der Waschbewegung** (Wellenauflauf / Wellenrücklauf) gebrochener Wellen war bis zu **rd. 50%** geringer gemessen worden.

Zudem konnte der Sturzbrecher bei allen Untersuchungen in seiner ausgeprägten Form nicht beobachtet werden, sodass die Auftretenswahrscheinlichkeit von **Druckschlägen gegen Null** tendieren dürfte.

Auf dieser Grundlage konnte 1992, unterstützt durch die Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt, Standort Hannover und das Niedersächsische Hafenamt Norden, an einem Wellenbrecher der Einfahrt zum Hafen der Insel Baltrum eine Naturerprobung gestartet werden. Das etwa 80m lange Hohldeckwerk hat seine Funktionsfähigkeit in den vergangenen 28 Jahre bis heute in allen aufgetretenen Sturmfluten vollständig bestätigt. Da in all diesen Jahren an diesem Bauwerk *keine* nennenswerten Reparaturmaßnahmen erforderlich waren, kann nur vermutet werden, aus welchen Gründen es in Deutschland bisher nicht gelungen ist, das **Hohldeckwerk** bei anderen *größeren* Bauvorhaben (wie z.B. 2006 als Deckwerk am Norddamm des Jade-Weser-Port) zu verwenden. Offenbar scheint das Geschäft mit der kurzfristig notwendigen Reparatur bekannter aber weniger effektiver konservativer Deckwerkssysteme für die Beteiligten lukrativer zu sein als die Aussicht auf eine langfristige wartungsfreie Betriebsfähigkeit. Andererseits wurden seinerzeit in Schleswig-Holstein vonseiten der Verwaltung jegliche Betonformkörper als Küstenschutzelemente abgelehnt.

Das in 5 weiteren europäischen Ländern gültige Patent wurde deshalb (aus Gründen der hohen Patent-Kosten) vom Verfasser bereits 2006 aufgegeben, als klar wurde, dass z.B. in den Niederlanden die eigenen weniger effektiven konservativen Deckwerkssysteme vorgezogen werden. Dagegen hatte die bekannte britische Ingenieurgesellschaft HR Wallingford Ltd. nach Veröffentlichung der vorteilhaften Untersuchungsergebnisse des Autors für **regelmäßig in der Falllinie** verlegte Hohlformkörper mit einem bis dahin als *Rauheitselement* (Rubble mound element) vorgesehenen weniger effektiven Hohlkörperelement das Patent in der Folgezeit praktisch umgangen. Obwohl mit diesem „Ersatzselement“, für das bereits existierende Schalungsformen verwendet worden waren, der volle Wirkungsgrad der „Hollow Cubes“ des Autors **nicht** erreicht werden kann und dieses sich aufgrund zu filigraner Ausbildung als **schadensanfällig** herausgestellt hat, ist es der in der Region des

Persischen Golfes gut bekannten Firma gelungen, dort noch eine Reihe ähnlicher Bauwerke zu erstellen. Als Beispiel sei die Hotel-Insel des Burj Al Arab in Dubai, gebaut 1994-1999, genannt.

Aus den genannten Gründen hat der Autor es vorgezogen, sich nicht weiterhin offensiv für die Vermarktung des am Persischen Golf ohnehin nicht gültigen Patentes einzusetzen, obwohl Messungen gezeigt hatten, dass mit 1:2 geneigten Hohlkörperstrukturen in **Stapelbauweise** noch wesentlich höhere Wirkungsgrade erreicht werden können.

Andererseits hat der Autor die Einladung der Huaihe River Commission in Bengbu City, Anhui, P.R.China im Jahre 2002 gern angenommen, vor großem chinesischen Wissenschaftler-Publikum über die Vorzüge des Systems „Hollow Cubes“ gegenüber anderen Deckwerksarten zu berichten.

Das System wird heute in China sowohl an Küstenstandorten als auch an Dämmen von Hochwasser-Rückhaltebecken und stark belasteten Flussufern eingesetzt.

Für den Fall, dass künftig seitens der Wasserbauverwaltung oder seitens eines Unternehmens Interesse an der Verwendung von Hohldeckwerken bestehen sollte, bietet der Autor weiterhin seine Unterstützung bei der konkreten Ausgestaltung der betreffenden Hohlformkörper an.

Langjährige Forschungsaktivität zur Thematik „Resonanz und Anomale Dispersion bei Wasserwellen.“

Bei der Auswertung seiner vor Sylt bereits 1973/1974 durchgeführten Naturmessungen hochenergetischer Brandungswellen während einer schweren Sturmflut war der Autor auf das bis dahin für Schwerewellen unbekannte Phänomen der **anormalen Dispersion** gestoßen. Unter Dispersion wird bei den meisten Wellenarten die Abhängigkeit der Phasengeschwindigkeit (Wellenfortschrittsgeschwindigkeit) $c[m/s]$ von der Frequenz $f[Hz]$ bzw. von der Wellenlänge $L[m]$ verstanden. Bei Schwerewellen ist diese **normal** und durch $dc/df \leq 0$ bzw. $dc/dL \geq 0$ gekennzeichnet, etwa vergleichbar den elektromagnetischen Wellen (EM-Wellen) im Bereich des sichtbaren Lichts mit der bekannten Abfolge der Spektralfarben. **Resonanzen** treten aber insbesondere auch bei EM-Wellen zusammen mit dem Phänomen der anomalen Dispersion mit $dc/df > 0$ bzw. $dc/dL < 0$ auf. Als Ergebnis der Suche nach analogen Bedingungen bei Wasserwellen hat der Autor insbesondere zwei unterschiedliche Modellvorstellungen für (partiell) stehende Wellen im Zusammenhang mit resonanten Beckenschwingungen als anwendbar erkannt:

In der Natur als Resonanz der von See kommenden Wellen (Erreger) mit **partiell stehenden Halbwellen** in einem abgrenzbaren Beckenvolumen (Resonator) und
im verkleinerten Modell als Resonanz des Wellenerzeugers (Erreger) mit **partiell stehenden Viertelwellen** im Wellenkanal (Resonator).

Tatsächlich hatten die Spektral-Untersuchungen, die die betreffenden resonanten Zustände im KSW dokumentieren, erst ab 1992 durchgeführt werden können, vergl. <http://www.digibib.tu-bs.de/?docid=00054097>. Somit konnte auch diese Thematik erst nach dem Ausscheiden des Autors aus der FH Bielefeld zu einem befriedigenden Abschluss gebracht werden.

Veröffentlichungen von Fritz Büsching seit seiner Berufung 1984 an die FH Bielefeld University of Applied Sciences.

(Davon etwa 37 mit Bezug zum „Kombinierten Strömungs- und Wellenkanal (KSW)“ bis 2020.)

SCHWINGUNGSANREGUNG EINES SCHIEBETORES INFOLGE UNDICHTIGKEIT AM DREMPEL, Internat. Konferenz SCHIFFFAHRTSSCHLEUSEN, Breslau, Polen, S.5-11, 1984, Digibib TUBS, 2013 / von Fritz Büsching <http://www.digibib.tu-bs.de/?docid=00054165>

Schwingungsanregung eines Schiebetores infolge Undichtigkeit am DrempeL, Bauingenieur 60 (1985) pp. 109-111, Digibib TUBS, 2012 / von Fritz Büsching <http://www.digibib.tu-bs.de/?docid=00046741>

Wave Transformation and Dispersion with Special Reference to the Post Breaking Zone, 1st.Int. Symposium on Harbours, Port Cities and Coastal Topography, Haifa, Israel, Sept. 22.- 29, 1986, S.39-42.Digibib TUBS, 2013 / von Fritz Büsching <http://www.digibib.tu-bs.de/?docid=00054178>

SCHIFFSHEBEWERK AM JANGTSEKIANG, Bauingenieur 61, S.490, 1986,
 Digibib TUBS, 2013 / von Fritz Büsching <http://www.digibib.tu-bs.de/?docid=00054154>

Kombinierter Strömungs- und Wellenkanal / Fritz Büsching
 Bielefelder FH-Magazin (4), S.36-37, 1987, <http://www.digibib.tu-bs.de/?docid=00056882>

KONSTRUKTIVER WASSERBAU IN MINDEN, 1). Die Weser (62), H.7/8 S.183-185, 1988. 2). Ostwestfälische Wirtschaft, H.1, S.32-33, 1989 Digibib TUBS, 2013 / von Fritz Büsching <http://www.digibib.tu-bs.de/?docid=00054173>

Durchströmbare Böschungsstrukturen. Bauingenieur 66 (1991) pp.11-14,
 Digibib TUBS, 2012 / von Fritz Büsching, <http://www.digibib.tu-bs.de/?docid=00046743>

UFERSCHUTZWERK, DEICHAUßENBÖSCHUNG, STAUWAND OD. DGL. SOWIE ZUGEHÖRIGE BAUELEMENTE.
 Offenlegungsschrift DE 39 30997 A1 Deutsches Patentamt 4.4.91, Bundesdruckerei 02.91 108014/29, 1991

UFERSCHUTZWERK, LÄNGSWERK, QUERWERK, WELLENBRECHER OD. DGL. SOWIE ZUGEHÖRIGE BAUELEMENTE.
 Offenlegungsschrift DE 40 11504 A1 Deutsches Patentamt 17.10.91, Bundesdruckerei 08.91 108042/51, 1991

Wave and Downrush Interaction on Sloping Structures 10th International Harbour Congress, 15-19 June 1992, Antwerp, Belgium, Proceedings pp. 5.17-5.25. Digibib TUBS, 2012 von Fritz Büsching <http://www.digibib.tu-bs.de/?docid=00046688>

Imperfect Reflection from Permeable Revetment Structures, 1st International Colloquium, CEA Techniques Rzeszow, Poland, S. 177-189, 12.-14.09.1994

Hollow Revetment Elements / by Fritz Büsching. - COPEDEC IV, Rio de Janeiro, Brazil, 25-29 September 1995; Digibib TUBS, 2012 <http://www.digibib.tu-bs.de/?docid=00043817>.

DISPERSION EFFECTS OF SHALLOW WATER GRAVITY WAVES, Bielefeld Univ. of Applied Sciences, Architektur & Bauingenieurwesen: Papers on Coastal Engineering, 1996, englisch, Speranski, N.& Büsching, F, pp 1-18, Digibib TUBS, 2013/ von Fritz Büsching, <http://www.digibib.tu-bs.de/?docid=00047043>

On the Change of Reflection from Different Sloping Structures, 2nd International Colloquium, CEA Techniques, Bielefeld, 1995, S.305-314.

Dispersionseffekte bei Schwerewellen im Flachwasser
 Die Küste H. 58 (1996), pp. 161-177, Digibib TUBS, 2013 / von Nikolai Speranski und Fritz Büsching, <http://www.digibib.tu-bs.de/?docid=00047795>

Reflection from Hollow Armour Units / by Fritz Büsching. - COPEDEC V, Cape Town, South Africa, 19-23 April 1999; Proc. pp. 1362-1370; Presentation 35 slides. Digibib TUBS, 2012 <http://www.digibib.tu-bs.de/?docid=00043820>

Combined Dispersion and Reflection Effects at Sloping Structures /by Fritz Büsching
 Inaugural International Conference on Port and Maritime R & D and Technology, Singapore 29-31 Oct. 2001, Proc. pp.411-418. Digibib TUBS, 2013, <http://www.digibib.tu-bs.de/?docid=00047023>

DISPERSION AND REFLECTION AT SLOPING STRUCTURES, 5. Juni 2000, International Conference PORT DEVELOPMENT & COASTAL ENVIRONMENT, Varna, Bulgaria 35 Folien

Hohldeckwerke, Forschungsprojekt d. BMBF Förderkennzeichen: 1701098, FH Bielefeld, Labor f. Hydromechanik Hollow Cubes, HANSA, Nr.10, S. 62-65, auch Presentation 49 Folien, 2001. Digibib TUBS, 2013 / von Fritz Büsching <http://www.digibib.tu-bs.de/?docid=00054244>

Bemessung wellenbelasteter Hohldeckwerke, Prof. Dr.-Ing. Fritz Büsching, S. 0- 47, Aug. 2001, Digibib TUBS, 2013 / <http://www.digibib.tu-bs.de/?docid=00054240>

PLACED BLOCK REVETMENT STRUCTURES including "Hollow Cubes"
 – a new type of Hollow Revetment Elements – Bengbu , P.R.China. 27.11.2002, 78 Folien

Sturmwellen-Resonanz an der Westküste der Insel Sylt
 Die Küste Heft 67, (2003) pp. 51-82. urn:nbn:de:0066-2007060107
 Digibib TUBS, 2013 / von Fritz Büsching <http://www.digibib.tu-bs.de/?docid=00047046>

Storm Wave Resonance Controlled by Hollow Block Structures, by Fritz Büsching, COPEDEC VI, Colombo, Sri Lanka, Paper No. 090, also Presentation 32 Slides, 2003, <http://www.digibib.tu-bs.de/?docid=00056466>

Sturmwellenresonanz an einem Sandriff, 'Klimaänderung und Küstenschutz' KLIKU, Warburg Haus der Universität Hamburg, 29. u. 30. November 2004 Proceedings pp. 73–82 & Anhang. Digibib TUBS, 2012/ von Fritz Büsching, <http://www.digibib.tu-bs.de/?docid=00046682>

STORM WAVE RESONANCES AT A SAND RIDGE,
 CD Proceedings: Paper No. O23, Hydrodynamics and Morphodynamics in Estuaries and Coastal Seas - PECS 2004, Merida , Mexico, 2004.

Wave Resonances Detected in a Wave Tank and in the Field – Fifth International Symposium WAVES 2005, 3rd-7th July, 2005 Madrid, Spain, Paper number 134. p. 1-12 & 1-2. Presentation 32 slides. Ergänzt durch Folgerungen aus dem Nachweis des Phasensprunges an steilen Uferböschungen (2010); Digibib TUBS, 2012 / von Fritz Büsching, <http://www.digibib.tu-bs.de/?docid=00043938>

Phase Jump Due to Partial Reflection of Irregular Water Waves at Steep Slopes, Coastlab 2010, Barcelona, extended version of paper 67, pp.1-25, Digibib TUBS, 2013 / von Fritz Büsching, <http://www.digibib.tu-bs.de/?docid=00047044>

Phasensprung bei der partiellen Reflexion irregulärer Wasserwellen an steilen Uferböschungen / von Fritz Büsching, HANSA - International Maritime Journal - C 3503 E, 147, H.5 pp 87-98, 2010, BINNENSCHIFFFAHRT - C 4397 D, 65, H.9 pp 73-77 & H.10 pp 64-69, 2010, <http://www.digibib.tu-bs.de/?docid=00056885>

Komplexe Reflexionskoeffizienten für Wasserwellen (Zur Klassifizierung von Brandungseffekten an Küstenschutzbauwerken) Die Küste H. 78 (2011) Digibib TUBS, 2013 / von Fritz Büsching, <http://www.digibib.tu-bs.de/?docid=00047022>.

Zur Phaseninformation des komplexen Reflexionskoeffizienten bei wellenbelasteten Uferböschungen, 7 Seiten, Digibib TUBS, 2012 / von Fritz Büsching <http://www.digibib.tu-bs.de/?docid=00043410>

Complex Reflection Coefficients of Water Waves - On the Classification of Types of Breakers -, Digibib TUBS, 2012 / by Fritz Büsching <http://www.digibib.tu-bs.de/?docid=00045344>

Complex Reflection Coefficients Applied to Steep Sloping Structures, PowerPoint-Präsentation zu 'Complex Reflection Coefficients Applied to Steep Sloping Structures', Coastlab12, 17.-20. September 2012, Ghent, Belgium. (4th International Conference on the Application of Physical Modelling to Port and Coastal Protection, Universiteit Gent), Digibib TUBS, 2012 von Fritz Büsching <http://www.digibib.tu-bs.de/?docid=00045521>

Sturmbrandungsphänomene an der Westküste der Insel Sylt, Die Küste H. 80 (2013), Digibib TUBS, 2013 / von Fritz Büsching <http://www.digibib.tu-bs.de/?docid=00054097>

Resonanz und Anomale Dispersion bei Wasserwellen, Digibib TUBS, 2014 / Fritz Büsching <http://www.digibib.tu-bs.de/?docid=00056747>

Storm Surf Phenomena at the Western Coast of Sylt Island, Digibib TUBS, 2015 / Fritz Büsching <http://www.digibib.tu-bs.de/?docid=00058824>

Sturmbrandungsphänomene an der Westküste der Insel Sylt, Digibib TUBS, 2015 / Fritz Büsching <http://www.digibib.tu-bs.de/?docid=00054097>

Resonance and Anomalous Dispersion of Water Waves, Digibib TUBS, 2015 / Fritz Büsching <http://www.digibib.tu-bs.de/?docid=00059164>

Komplexe Reflexionskoeffizienten (CRC) bei irregulären Wasserwellen an steilen Uferböschungen, Pdf-Version 26 Seiten einer PowerPoint Präsentation m. 52 Folien, Zugehörig zu YouTube-Video mp4 gleichen Titels 7.04.2017, Digibib TUBS, 2019 / Fritz Büsching, <https://doi.org/10.24355/dbbs.084-201912111303-0>

Schwingungs-Interferenzen im abgegrenzten Orbitalfeld von Meereswellen in Theorie und physikalischem Modell, Digibib TUBS, 2019 / Fritz Büsching / <https://doi.org/10.24355/dbbs.084-201912201126-0>

Vibration Interferences in the Limited Orbital Field of Sea Waves in Theory and Physical Model, Digibib TUBS, 2019 / Fritz Büsching / <https://doi.org/10.24355/dbbs.084-202002031131-0>

Influence of the Sea-Bed-Inclination on the Water Wave Motion in the Range of Decreasing Water Depth – New Theoretical Approach -, Digibib TUBS, 2020 / Fritz Büsching / <https://doi.org/10.24355/dbbs.084-202008031451-0>

Einfluss der Seegrundneigung auf die Wasserwellenbewegung im Bereich abnehmender Wassertiefe – Ein neuer theoretischer Ansatz -, Digibib TUBS, 2020 / Fritz Büsching / <https://doi.org/10.24355/dbbs.084-202008031448-0>

64 Fundstellen auf dem Gemeinsamen Verbundkatalog K10+ unter: <https://kxp.k10plus.de/DB=2.1/PPNSET?PPN=1702698866> und <https://kxp.k10plus.de/DB=2.1/PPNSET?PPN=1702698645>

Prof. Dr.-Ing. Fritz Büsching, Dießelhorststr. 01, 38116 Braunschweig, buesching@hollow-cubes.de; 27.08.2020.